

A Review on Using Ultrasonic Waves to Evaluate the Characteristics of Asphalt Pavement

Pooyan Ayar[✉]  | Alireza Ashnavar  | Ali Ruhi 

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: ayar@iust.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 09 Feb. 2023

Revised 18 Feb. 2023

Accepted 26 Feb. 2023

Keywords:

Asphalt Pavement,
Non-Destructive Test,
Ultrasonic Waves

ABSTRACT

Non-destructive methods are used as accurate tools to evaluate and monitor asphalt mixtures. Among these methods, ultrasonic waves have been proposed as a widely used technique to evaluate the properties of asphalt mixtures. The use of ultrasonic waves has several significant advantages in the asphalt pavement evaluation process, including measuring voids and density, determining mechanical properties, and examining durability. By increasing the amount of air voids in asphalt mixtures, the speed of ultrasonic waves will decrease. In addition, ultrasonic waves make it possible to determine different mechanical properties of asphalt mixtures. To better understand the mechanical behavior of asphalt mixtures, researchers have proposed various mathematical relationships. These relationships establish connections between different moduli, including dynamic and Young's moduli, which act as basic mechanical properties of asphalt mixtures, and variables related to ultrasonic waves. Also, the speed of ultrasonic waves decreases when the asphalt mixtures are exposed to moisture damage. Therefore, with the increase in durability, the speed of ultrasound waves increases. In addition, changes in the amount of bitumen in the asphalt mixture have a significant effect on the speed of ultrasonic waves. Changes in the amount of bitumen affect the stiffness and density of the asphalt mixture and subsequently change the characteristics of the propagation of ultrasonic waves. By studying these effects, engineers can deepen their understanding of the relationship between bitumen content and mixture properties and develop relationships governing these phenomena and the optimal asphalt mixture. This research focuses on the application of ultrasonic methods to evaluate the properties of asphalt mixtures. The aim of this research is to investigate the relationships between these properties and variables related to ultrasonic waves, such as wave speed and propagation time, and to contribute to the advancement of the understanding of asphalt mixture behavior and the development of more effective and sustainable road construction.

Cite this article: Ayar, P., Ashnavar, A. & Ruhi, A. (2023). A Review on Using Ultrasonic Waves to Evaluate the Characteristics of Asphalt Pavement. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (2), 62-70. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.400881.1120>

مروری بر استفاده از امواج فراصوتی برای ارزیابی ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی

پویان ایار[✉] | علیرضا آشناور | علی روحی

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، رایانامه: ayar@iust.ac.ir

چکیده:

روش‌های غیر مخرب، به عنوان ابزارهای دقیق ارزیابی و پایش مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند. در میان این روش‌ها، امواج فراصوتی به‌عنوان یک تکنیک پرکاربرد برای ارزیابی خواص مخلوط‌های آسفالتی مطرح شده‌اند. استفاده از امواج فراصوتی چندین مزیت قابل توجه در فرآیند ارزیابی روسازی آسفالتی از جمله اندازه‌گیری فضای خالی و چگالی، تعیین خواص مکانیکی و بررسی دوام دارد. با افزایش میزان فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی، سرعت امواج فراصوتی کاهش‌یابند. علاوه بر این، امواج فراصوتی تعیین خواص مکانیکی مختلف مخلوط‌های آسفالتی را امکان‌پذیر می‌سازد. برای درک بیشتر رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، محققان روابط ریاضی مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند. این روابط بین مدول‌های مختلف از جمله مدول دینامیکی و یانگ، که به عنوان خواص مکانیکی اساسی مخلوط‌های آسفالتی عمل می‌کنند و متغیرهای مربوط به امواج فراصوتی، ارتباط برقرار می‌کند. همچنین، سرعت امواج فراصوتی با قرار گرفتن مخلوط‌های آسفالتی در معرض آسیب‌های رطوبتی کاهش می‌یابد. لذا با افزایش دوام، سرعت امواج فراصوتی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تغییرات در میزان قیر در مخلوط آسفالتی تاثیر قابل توجهی بر سرعت امواج فراصوتی دارد. تغییرات در میزان قیر بر سفتی و چگالی مخلوط آسفالتی اثر می‌گذارد و متعاقباً ویژگی‌های انتشار امواج فراصوتی را تغییر می‌دهد. با مطالعه این اثرات، مهندسان می‌توانند درک خود را از رابطه بین میزان قیر و خواص مخلوط عمیق‌تر کنند و به توسعه‌ی روابط حاکم بر این پدیده‌ها و مخلوط آسفالتی بهینه‌پردازند. این پژوهش، بر روی کاربرد روش‌های فراصوت برای ارزیابی خواص مخلوط‌های آسفالتی تمرکز دارد. هدف این پژوهش، بررسی روابط بین این خواص و متغیرهای مرتبط با امواج فراصوتی، مانند سرعت موج و زمان انتشار و همچنین کمک به پیشرفت درک رفتار مخلوط آسفالتی و توسعه راهسازی موثرتر و پایدارتر است.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۲/۰۷

کلیدواژگان:

روسازی آسفالتی،
آزمایش غیرمخرب،
امواج فراصوتی

استناد: پویان، ایار، آشناور، علیرضا و روحی، علی. (۱۴۰۱). مروری بر استفاده از امواج فراصوتی برای ارزیابی ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی.

مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب، ۳ (۲)، ۷۰-۶۲. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.400881.1120>

۱- مقدمه

اهمیت ارزیابی وضعیت ساختاری روسازی آسفالتی با روش‌های غیرمخرب به منظور اطمینان از عملکرد مناسب آن از یک سو و قابلیت ارائه اطلاعات دقیق و جامع توسط روش غیرمخرب فراصوت از سوی دیگر، بررسی روش فراصوت در پایش و ارزیابی روسازی آسفالتی را ضروری می‌سازد. لذا، به منظور تبیین کاربرد روش فراصوت در ارزیابی ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی، این پژوهش گزارشی از مطالعات مرتبط را ارائه می‌کند.

روسازی‌های آسفالتی که بخش قابل توجهی از روسازی‌های جهان را شامل می‌شوند، همواره در معرض بارهای ترافیکی مداوم و عوامل محیطی قرار دارند. این عوامل می‌توانند منجر به بروز خرابی‌های متعددی در روسازی آسفالتی شده و خدمت‌دهی روسازی را کاهش دهند. از این رو، بهره‌گیری از آزمایشات مختلف به منظور اطمینان از قابلیت اعتماد، ایمنی و ویژگی‌های عملکردی روسازی آسفالتی ضروری می‌باشد.

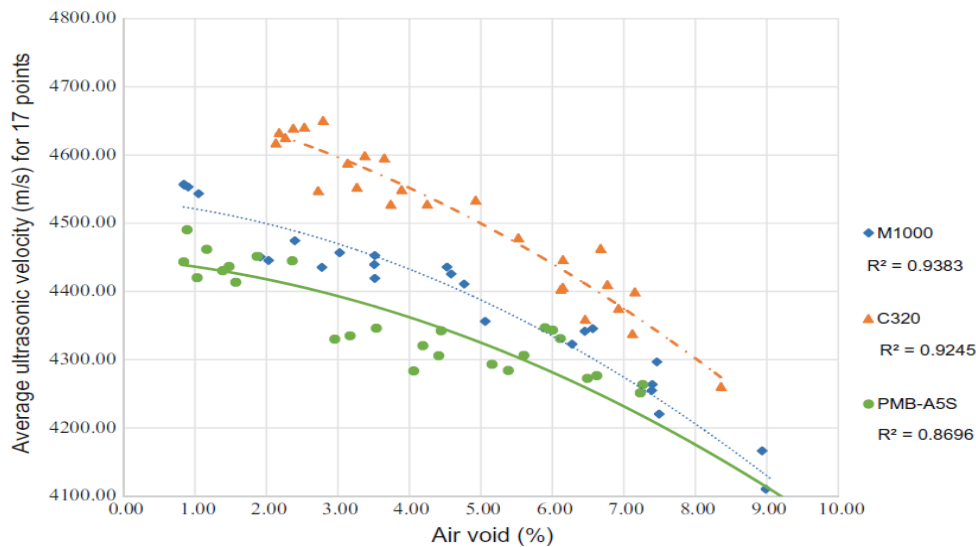
۲- ارتباط ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی و امواج فراصوتی

۲-۱- ویژگی‌های فیزیکی

از میان عواملی که بر ویژگی‌های عملکردی روسازی اثر می‌گذارند، فضای خالی و توزیع آن از متغیرهای بسیار کلیدی می‌باشند که در طراحی روسازی اهمیت ویژه‌ای دارند [۱۱]. در صورتیکه میزان فضای خالی از محدوده استاندارد مشخص شده کمتر باشد، روسازی دچار تغییر شکل فراتر از محدوده (شیار شدگی) می‌شود [۱۲]. در مقابل، اگر میزان فضای خالی از میزان حداکثر استاندارد تجاوز کند، نتایجی از قبیل تسریع سخت‌شدگی قیر از طریق اکسیداسیون، شن‌زدگی و عریان‌شدگی در لایه آسفالتی پدیدار می‌شود. در آزمایشگاه، ارزیابی دقیق میزان فضای خالی نمونه‌های آسفالتی یک امر اساسی برای فرآیندهای کنترل کیفیت و تضمین کیفیت می‌باشد [۱۳]. با مطالعات انجام شده در آزمایشگاه دریافت شد که با بهره‌گیری از امواج فراصوتی می‌توان فضای خالی نمونه‌های آسفالتی را ارزیابی کرد. شکل ۱ ارتباط میان فضای خالی موجود در مخلوط‌های آسفالتی با انواع مختلفی از قیر و سرعت امواج فراصوتی را نشان می‌دهد. با انجام آزمایش فراصوت با فرکانس ۳۰ کیلوهرتز، نشان داده شد که با افزایش میزان فضای خالی در نمونه‌های آسفالتی، سرعت امواج فراصوتی در نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۱۴]. همچنین داده‌ها نشان می‌دهد که آزمایش فراصوت بر روی نمونه‌ها برای اندازه‌گیری میزان فضای خالی ۰ تا ۱۰ درصد موثر می‌باشد. شایان ذکر است که توزیع فضای خالی در نمونه‌های آسفالتی یکنواخت نبوده و می‌تواند از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر متفاوت باشد [۱۵].

آزمایش‌های مخرب، علی‌رغم توانایی سنجش و ارزیابی ویژگی‌ها و عملکرد روسازی آسفالتی، بسیار پرهزینه و زمان‌بر بوده و از قابلیت تکرار به دفعات زیاد محروم‌اند [۱،۲]. به همین دلیل، استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب در سالیان اخیر رواج یافته است. آزمایش‌های غیرمخرب، راه‌حلی عملی به منظور به‌دست آوردن مجموعه داده‌های متعدد در لایه‌های مختلف روسازی به منظور تعیین ویژگی‌های عملکردی بدون آسیب رساندن به لایه‌های آن ارائه می‌دهند [۳].

آزمایش‌های سنتی غیرمخرب مانند انحراف‌سنج وزنه در حال سقوط به طور گسترده در روسازی آسفالتی استفاده می‌شوند [۴،۵]. اما، این روش‌ها به اطلاعاتی از جمله ضخامت روسازی برای تحلیل عملکرد آن نیاز دارند و اغلب وقت‌گیر، دارای خطا، و شامل اختلالات ترافیکی هستند [۶]. از این رو، آزمایش غیرمخرب فراصوت به عنوان یک روش قابل اعتماد برای ارزیابی وضعیت ساختاری و عملکرد روسازی‌های آسفالتی استفاده می‌شود [۷]. این روش با استفاده از امواج صوتی با فرکانس بالا، می‌تواند رویکردی سریع‌تر و اقتصادی‌تر به منظور ارزیابی ویژگی‌های لایه‌های مختلف روسازی، از جمله ضخامت لایه‌ها و شرایط پیوند بین لایه‌ای را امکان‌پذیر سازد [۸]. علی‌رغم مزایای متعدد روش فراصوت به منظور ارزیابی عملکرد روسازی آسفالتی، این روش به تحلیلگران ماهر و توسعه طرح‌های پردازش سیگنال نیاز دارد [۹]. علاوه بر این، کمی‌سازی عدم قطعیت برای اطمینان از تفسیرهای نتایج و اندازه‌گیری‌های قابل اعتماد، بسیار مهم می‌باشد. علاوه بر این، استفاده از امواج فراصوتی در مخلوط‌های آسفالتی با میرایی زیاد همراه است [۱۰]. لذا از فرکانس‌های پایین برای ارزیابی ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی با امواج فراصوتی استفاده می‌شود.



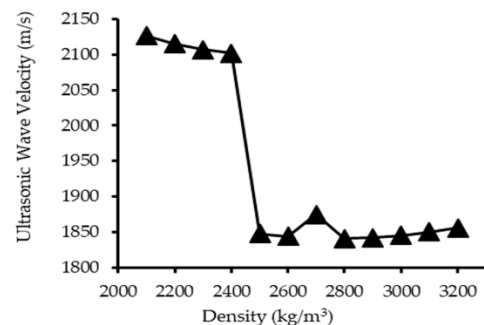
شکل ۱- رابطه سرعت امواج فراصوتی با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز و درصد فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی [۱۵]

۲-۲- ویژگی‌های مکانیکی و رئولوژیکی

۲-۲-۱- متغیرهای مکانیکی

خواص مکانیکی و رئولوژیکی روسازی آسفالتی از عوامل بسیار مهم در طراحی آن می‌باشد. مهمترین کاربرد امواج فراصوتی در روسازی آسفالتی، تعیین خواص مکانیکی آن می‌باشد. جدول ۱ روابط میان خواص مکانیکی و رئولوژیکی مخلوط‌های آسفالتی و سرعت و زمان انتشار امواج فراصوتی را نشان می‌دهد. اساساً مدول یانگ مقاومت روسازی را در برابر تغییر شکل الاستیک (قابل برگشت) تحت بار وارده اندازه‌گیری می‌شود. با این حال مدول دینامیکی همان تعریف مدول یانگ است اما بارگذاری آن دینامیکی (به صورت ارتعاشی) اعمال می‌شود. به طور معمول، بارگذاری لایه‌های روسازی به صورت دینامیکی می‌باشد، به همین دلیل اصطلاح مدول دینامیکی همواره در ارزیابی روسازی به کار برده می‌شود [۱۹].

چگالی از دیگر متغیرهای مهم مخلوط‌های آسفالتی است زیرا تضمین می‌کند که روسازی می‌تواند بارهای ترافیکی سنگین را بدون تغییر شکل تحمل کند و همچنین به مقاومت در برابر نفوذ رطوبت کمک می‌کند [۱۶، ۱۷]. شکل ۲ رابطه میان سرعت امواج فراصوتی با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز و چگالی مخلوط‌های آسفالتی در نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- رابطه سرعت امواج فراصوتی با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز و چگالی مخلوط‌های آسفالتی در یک سری نمونه آزمایشگاهی [۱۸]

جدول ۱- رابطه خواص مکانیکی و رئولوژیکی مخلوط‌های آسفالتی و امواج فراصوتی

مرجع	خواص مکانیکی	رابطه
[۲۰-۲۲]	مدول یانگ	$E = \frac{\rho v_s^2 (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2}$
[۱۹]	مدول دینامیکی	$E_u = 1.274 \times 10^9 \frac{Wh (1+v)(1-2v)}{d^2 t^2 (1-v)}$
[۲۳]	مدول دینامیکی	$E_{dyn} = p \cdot V^2 \frac{(1+v) \cdot (1-2v)}{1-v}$
[۲۴]	مدول مرکب	$ E^* = \frac{p \cdot V_{\Phi,p}^2 \cdot \omega^2}{(\omega^2 + \alpha_p^2 \cdot V_{\Phi,p}^2)} \frac{(1+v) \cdot (1-2v)}{1-v}$
[۲۴]	زاویه فازی	$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \alpha_p \cdot V_{\Phi,p} \cdot \omega}{(\omega^2 - \alpha_p^2 \cdot V_{\Phi,p}^2)} \right)$

در سطر اول E مدول یانگ برحسب مگاپاسکال، p و ρ چگالی یا جرم مخصوص برحسب کیلوگرم بر مترمکعب و v_s و v_p به ترتیب سرعت امواج فشاری و برشی فراصوت برحسب متر بر ثانیه هستند. در سطر دوم و سوم از جدول بالا E_u و E_{dyn} مدول دینامیکی برحسب مگاپاسکال، W بیانگر جرم برحسب کیلوگرم، h ارتفاع نمونه برحسب میلی متر، v نسبت پواسون، d قطر نمونه برحسب میلی متر و t زمان انتشار موج برحسب میکروثانیه می باشد. در سطرهای چهارم و پنجم، $V_{\Phi,p}$ سرعت فازی، α_p ضریب تضعیف و ω میزان نوسان می باشد.

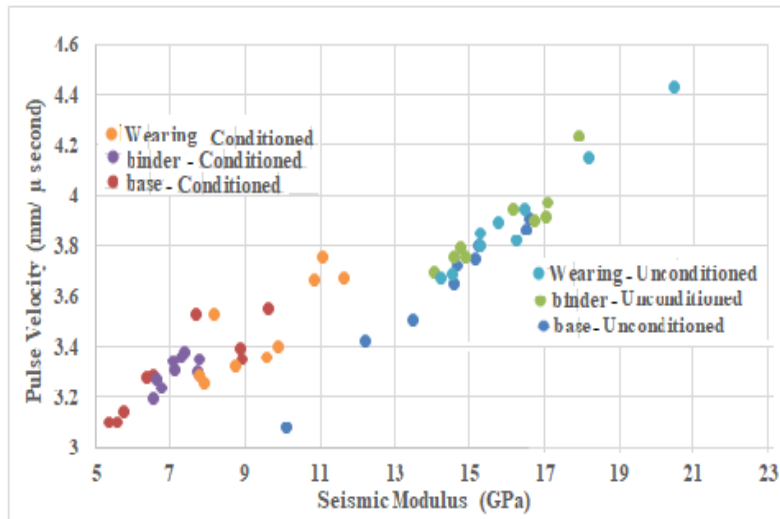
مدول سختی بدست آمده توسط آزمایش مدول سختی کششی غیرمستقیم همبستگی خوبی با نتیجه آزمون فراصوت دارد [۲۵]. مقایسه میان آزمایش مدول دینامیکی استاندارد (مستقیم) و آزمایش فراصوت (تست مدول دینامیکی غیر مستقیم) نشان داد که آزمون مدول دینامیکی غیرمستقیم در مقایسه با آزمایش مدول دینامیکی مستقیم مقدار بیشتری را نشان می دهد. با این حال، مقادیر مدول به دست آمده از آزمایش فراصوت همچنان می تواند به عنوان شاخص مقدار مدول دینامیکی روسازی‌های آسفالتی با کرنش کم با انجام ضریب تبدیل مورد استفاده قرار گیرد. در مخلوط تثبیت شده، نتیجه آزمایش فراصوت نشان داد که سرعت امواج فراصوتی شاخص خوبی برای کیفیت مخلوط‌های تثبیت شده است [۱۹].

۲-۲-۲- دوام

آسیب رطوبتی می تواند نتیجه خرابی اجزای مخلوط آسفالتی (آسیب در قیر و سنگدانه مخلوط آسفالتی)، خرابی در اجزای قیر (خرابی در خود قیر) و یا ترکیبی از این دو حالت باشد [۲۶]. آزمایش امواج فراصوتی می تواند ابزار مناسبی برای پایش بر تغییرات یکپارچگی مخلوط آسفالتی در شرایط رطوبتی باشد [۲۷]. مطالعات انجام شده در آزمایشگاه نشان داد که سرعت امواج فراصوتی با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز برای نمونه‌های آسفالتی قبل از اینکه در شرایط مرطوب قرار بگیرند در محدوده ۳/۱ الی ۴/۵ میلی متر بر میکروثانیه قرار دارد و هنگامی که نمونه‌ها در معرض آسیب رطوبتی قرار می گیرند سرعت امواج به ۳/۱ الی ۳/۸ میلی متر بر میکروثانیه کاهش می یابد. این کاهش سرعت می تواند به دلیل عریان شدگی لایه نازک قیر که اطراف سنگدانه را احاطه کرده و همچنین افزایش فضای خالی در مخلوط آسفالتی باشد. این نتایج را می توان به کاهش در میزان مدول ارتعاشی از محدوده ۱۰ الی ۲۱ گیگاپاسکال قبل از آسیب رطوبتی به محدوده ۵ الی ۱۲ گیگاپاسکال بعد از آسیب رطوبتی نیز نسبت داد که نتایج این پژوهش در شکل ۳ مشاهده می شود. در حقیقت این کاهش ناشی از عریان شدگی لایه نازک قیر به علت کاهش چسبندگی بین قیر و سنگدانه و در نتیجه کاهش چسبندگی بین سنگدانه‌ها

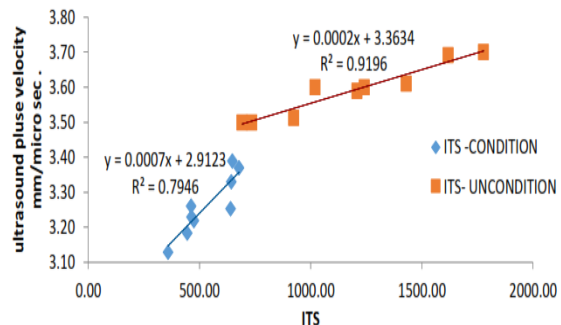
نمونه‌ها در چرخه آسیب رطوبتی، سرعت امواج فراصوتی با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز ۱۳ درصد کاهش می‌یابد که در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

می‌باشد [۲۸،۲۹]. همچنین در بررسی‌های دیگر بر روی آسیب رطوبتی با در نظر گرفتن تست کشش غیر مستقیم بر روی نمونه‌های آسفالتی دریافتند که پس از قرارگیری



شکل ۳- رابطه سرعت امواج فراصوتی با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز و مدول ارتعاشی در نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی [۲۸]

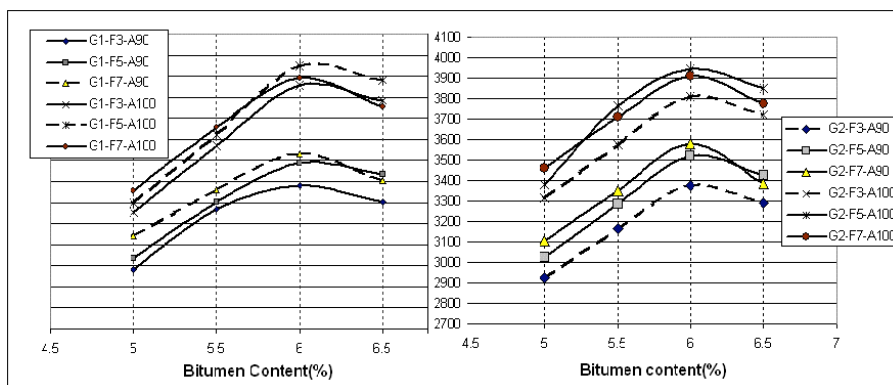
محتوای فیلر ۳، ۵ و ۷ درصد، آزمایش فراصوت با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز انجام شد و نشان داده شد که به طور کلی افزایش فیلر و درصد ذرات شکسته شده باعث افزایش سرعت امواج فراصوتی می‌شود [۱۰]. شکل ۵ و ۶ ارتباط میان درصد قیر در مخلوط‌های آسفالتی مختلف و سرعت امواج فراصوت (شامل امواج طولی P و برشی S) را نشان می‌دهد. مقدار قیر در نمونه آسفالتی دارای یک نقطه اکسترمم می‌باشد. هنگامی که مقدار قیر از اکسترمم نمودار کمتر باشد، با افزایش مقدار قیر سرعت امواج افزایش می‌یابد اما با عبور از نقطه اکسترمم با افزایش مقدار قیر سرعت موج کاهش می‌یابد. با ساخت ۴ نوع نمونه‌هایی با قیرهای PG64-28 و PG64-28R و PG76-22 و PG76-22R همراه با خرده لاستیک (R: نشانه افزودن خرده لاستیک می‌باشد) نشان داده شد که با افزایش مقدار قیر سرعت امواج فراصوتی برای PG64-28 و PG64-28R کاهش می‌یابد اما برای نمونه‌های PG76-22 و PG76-22R هیچ‌گونه روند قابل توجهی مشاهده نشده است [۳۱].



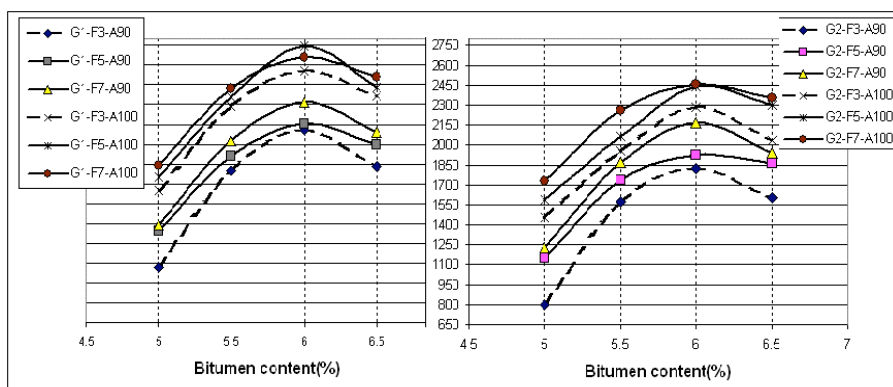
شکل ۴- رابطه سرعت امواج فراصوتی با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز و آسیب رطوبتی در نمونه‌های مختلف مخلوط‌های آسفالتی [۳۰]

۳-۲- میزان قیر

عوامل زیادی از جمله درصد ذرات شکسته شده، مقدار قیر، روش تراکم، دما، دانه‌بندی و مقدار فیلر بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی اثر می‌گذارند. در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های آسفالتی با دو نوع دانه‌بندی مختلف و برای هر دانه‌بندی با ۹۰ و ۱۰۰ درصد ذرات شکسته شده با



شکل ۵- رابطه سرعت امواج فراصوتی (امواج P) با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز و درصد قیر در مخلوط‌های آسفالتی [۱۰]



شکل ۶- رابطه سرعت امواج فراصوتی (امواج S) با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز و درصد قیر در مخلوط‌های آسفالتی [۱۰]

۳- نتیجه‌گیری

آزمایش امواج فراصوتی می‌تواند برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد. با بررسی رابطه ویژگی‌های مخلوط‌های آسفالتی و امواج فراصوتی، نتایج ذیل حاصل شده‌است:

- ۱- استفاده از امواج فراصوتی می‌تواند برای ارزیابی فضای خالی و چگالی در نمونه‌های آسفالتی مؤثر باشد. با افزایش فضای خالی در نمونه‌های آسفالتی، سرعت امواج فراصوت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی مخلوط‌های آسفالتی، سرعت امواج فراصوتی افت شدیدی پیدا می‌کنند. لذا، این روش می‌تواند به عنوان یک روش اندازه‌گیری کیفیت و تضمین کیفیت مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گیرد.
- ۲- استفاده از امواج فراصوتی می‌تواند در تعیین خواص مکانیکی و رئولوژیکی مخلوط‌های آسفالتی

مفید باشد. بین سرعت انتشار امواج فراصوتی و خواص مکانیکی و رئولوژیکی مخلوط‌های آسفالتی از جمله مدول یانگ، مدول دینامیکی، مدول مرکب و زاویه فازی روابط ریاضی حاکم است.

۳- آزمایش امواج فراصوتی به عنوان یک روش مفید و غیرمخرب در پایش تغییرات یکپارچگی و دوام مخلوط‌های آسفالتی در شرایط رطوبتی سودمند می‌باشد. سرعت امواج فراصوتی با قرار گرفتن مخلوط‌های آسفالتی در معرض آسیب‌های رطوبتی کاهش می‌یابد. این کاهش از محدوده ۳.۱ الی ۴.۵ میلی‌متر بر میکروثانیه به محدوده ۳.۱ الی ۳.۸ میلی‌متر بر میکروثانیه در برخی نمونه‌ها بوده است که حداکثر ۲۱ درصد کاهش سرعت را نشان می‌دهد. برخی نتایج دیگر ۱۳ درصد کاهش را نشان می‌دهند.

۴- مقدار قیر در مخلوط‌های آسفالتی بر سرعت امواج

- degradation of nano-tio2 particles-modified asphalt materials. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021.
- [9] Olisa, S.C., Khan, M.A., and Starr, A. (2021) Review of current guided wave ultrasonic testing (GWUT) limitations and future directions. *Sensors (Switzerland)*. 21 (3), 1–28.
- [10] Arabani, M., Kheiry, P.T., and Ferdosi, B. (2009) Laboratory evaluation of the effect of HMA Mixt parameters on ultrasonic pulse wave velocities. *Road Materials and Pavement Design*. 10 (1), 223–232.
- [11] Ren, J. and Sun, L. (2017) Characterizing air void effect on fracture of asphalt concrete at low-temperature using discrete element method. *Engineering Fracture Mechanics*. 170 23–43.
- [12] Roy, N., Veeraragavan, A., and Krishnan, J.M. (2013) Influence of Air Voids of Hot Mix Asphalt on Rutting within the Framework of Mechanistic-empirical Pavement Design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 104 99–108.
- [13] Dubois, V., Roche, C.D. La, and Burban, O. (2010) Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples. *Construction and Building Materials*. 24 (6), 885–897.
- [14] Pan, W.H., Sun, X.D., Wu, L.M., Yang, K.K., and Tang, N. (2019) Damage detection of asphalt concrete using piezo-ultrasonic wave technology. *Materials*. 12 (3), 1–10.
- [15] Zargar, M., Banerjee, S., Bullen, F., and Ayers, R. (2019) An Investigation into the Use of Ultrasonic Wave Transmission Techniques to Evaluate Air Voids in Asphalt. 1273–1284.
- [16] Gong, H., Sun, Y., Hu, W., Polaczyk, P.A., and Huang, B. (2019) Investigating impacts of asphalt mixture properties on pavement performance using LTPP data through random forests. *Construction and Building Materials*. 204 203–212.
- [17] Brown, E.R. (1990) Density of Asphalt Concrete: How Much is Needed? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1282 (90), 27–32.
- [18] Zhang, W., Akber, M.A., Hou, S., Bian, J., Zhang, D., and Le, Q. (2019) Detection of dynamic modulus and crack properties of asphalt pavement using a non-destructive ultrasonic wave method. *Applied Sciences (Switzerland)*. 9 (15),
- فراصوتی تاثیر می‌گذارد. به‌طور کلی افزایش فیلر و درصد ذرات شکسته شده باعث افزایش سرعت امواج فراصوتی می‌شود. اما میزان قیر در نمونه آسفالتی دارای یک نقطه بهینه می‌باشد. هنگامی که مقدار قیر از نقطه اکس‌ترمم کمتر باشد، با افزایش مقدار قیر سرعت امواج افزایش می‌یابد اما با عبور از نقطه اکس‌ترمم، با افزایش مقدار قیر سرعت موج مجددا کاهش می‌یابد.
- ۴- مراجع
- [1] Jimoh, Y.A., Itiola, I.O., and Afolabi, A.A. (2015) Destructive and non-destructive determination of resilient modulus of hot mix asphalt under different environmental conditions. *International Journal of Pavement Engineering*. 16 (10), 857–867.
- [2] Kamruzaman, N., Hidayah, N., and Kamaruddin, M. (2021) Non-destructive Method for Asphalt Pavement Evaluation: A Review. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*. 2 (1), 315–322.
- [3] Goel, A. and Das, A. (2008) Nondestructive testing of asphalt pavements for structural condition evaluation: A state of the art. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 23 (2), 121–140.
- [4] Xiao, M., Luo, R., and Yu, X. (2022) Assessment of asphalt pavement overall performance condition using functional indexes and FWD deflection basin parameters. *Construction and Building Materials*. 341 (May), 127872.
- [5] Vyas, V., Singh, A.P., and Srivastava, A. (2021) Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks. *Road Materials and Pavement Design*. 22 (12), 2748–2766.
- [6] Sahafipour, A. (2020) Falling Weight Deflectometer (FWD) is not Reliable for Evaluation of Flexible Pavement. (July).
- [7] Hou, S., Deng, Y., Jin, R., Shi, X., and Luo, X. (2022) Relationships between Physical, Mechanical and Acoustic Properties of Asphalt Mixtures Using Ultrasonic Testing. *Buildings*. 12 (3), 1–17.
- [8] Ma, Y., Li, L., Wang, H., Wang, W., and Zheng, K. (2021) Laboratory study on performance evaluation and automobile exhaust

- [30] Kadium, N. sajad and Sarsam, S.I. (2020) Evaluating Asphalt Concrete Properties by the Implementation of Ultrasonic Pulse Velocity. *Journal of Engineering*. 26 (6), 140–151.
- [31] Jadidi, K., Khalili, M., and Karakouzian, M. (2021) Feasibility of Using Non-Destructive Ultrasound Measurement Technique to Evaluate Binder Content of Asphalt Mixtures. *CivilEng*. 2 (2), 396–405.
- [19] Norambuena-Contreras, J., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., Celaya, M., and Lombillo-Vozmediano, I. (2010) Dynamic modulus of asphalt mixture by ultrasonic direct test. *NDT and E International*. 43 (7), 629–634.
- [20] Birgisson, B., Roque, R., Tia, M., and Masad, E.A. (2005) Development and Evaluation of Test Methods to Evaluate Water Damage and Effectiveness of Antistripping Agents. *Chapters*. 2 (3), 6.
- [21] Tigdemir, M., Kalyoncuoglu, S.F., and Kalyoncuoglu, U.Y. (2004) Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation. *NDT and E International*. 37 (8), 597–602.
- [22] Donev, V., Lahayne, O., Pichler, B., and Eberhardsteiner, L. (2023) Ultrasonic characterisation of the elastic properties of mineral aggregates used in asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*.
- [23] Dimter, S., Rukavina, T., and Minažek, K. (2016) Estimation of elastic properties of fly ash-stabilized mixes using nondestructive evaluation methods. *Construction and Building Materials*. 102 505–514.
- [24] Larcher, N., Takarli, M., Angellier, N., Petit, C., and Sebbah, H. (2015) Towards a viscoelastic mechanical characterization of asphalt materials by ultrasonic measurements. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 48 (5), 1377–1388.
- [25] Arabani, M., Khe Iry, P.T., and Ferdowsi, B. (2012) Use of ultrasonic pulse velocity (UPV) for assessment of HMA mixtures behavior. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. 36 (C1), 111–114.
- [26] Emerging, S. and Resiliency, T. (2018) Impacts of Moisture on Asphalt Properties. .
- [27] Birgisson, B., Roque, R., and Page, G.C. (2003) Ultrasonic Pulse Wave Velocity Test for Monitoring Changes in Hot-Mix Asphalt Mixture Integrity from Exposure to Moisture. *Transportation Research Record*. (1832), 173–181.
- [28] Sarsam, S.I. (2021) Suitability of Nondestructive Testing of Asphalt Concrete for Detecting the Impact of Moisture Damage. *Britain International of Exact Sciences (BloEx) Journal*. 3 (1), 73–83.
- [29] Arepalli, U.M. (2018) A Study of Moisture Induced Material Loss of Hot Mix Asphalt (Hma). *PhD Thesis*. (February), 1–10.